

Моделирование свайного основания как системы узлов  
с парным взаимодействием:  
сравнительный анализ результатов моделирования

А.И. Русаков

Адекватность расчетов фундаментных плит на сваях проверялась на нескольких типовых фундаментах. Для каждого из них сравнивались результаты расчетов, полученных по модели с упругими связями, по конечно-элементной линейно-упругой модели основания и по конечно-элементной модели, в которой предельное состояние грунта задается условием Мизеса-Шлейхера [1, с. 76] (кулоновский грунт).

Как пример расчета нагрузок на сваи рассмотрим жесткую квадратную ФП 19,5×19,5 м, которая нагружена давлением 25 т/м<sup>2</sup> (такое среднее нормативное давление на грунт создает ФП 17-этажного дома с полным каркасом). СП под плитой имеет шаг 1,5 м, число слоев грунта под плитой  $n = 3$ ,  $m = 2$ ; характеристики слоев даны в табл. 1.

Таблица 1

$i$	Вид грунта	$h_i$ , м	$E_i$ , т/м <sup>2</sup>	$\nu_i$	$\varphi_i$ , град	$c_i$ , т/м <sup>2</sup>
1	песч.	4	2000	0,3	30	0,5
2	глинист.	6	1000	0,35	13	3
3	глинист.	10	1000	0,35	13	3

Примечание к таблице.  $\varphi_i$  — угол внутреннего трения;  $c_i$  — коэффициент сцепления.

На рис. 1 показан первый квадрант СП с эпюрами нагрузок на сваи по двум базовым линиям<sup>1</sup>. Расчет нагрузок на сваи по кнопочной модели дает постоянную величину  $N_{кн} = 49$  т. Для рассматриваемой расчетной схемы эта величина определяет требуемую допускаемую нагрузку на сваю в расчетах по кнопочной модели. Несущая способность сваи по грунту основания получается умножением допускаемой нагрузки на коэффициент надежности (см. СП 50-102-2003, п. 7.1.11) и может составлять до 70 т. Это существенно меньше нагрузки 125 т, действующей на угловую сваю в случае кулоновского грунта, и несколько меньше нагрузки 81 т на сваю посередине крайнего ряда (рис. 1, эпюра

<sup>1</sup> Физический смысл имеют только ординаты эпюр, расположенные напротив соответствующих свай.

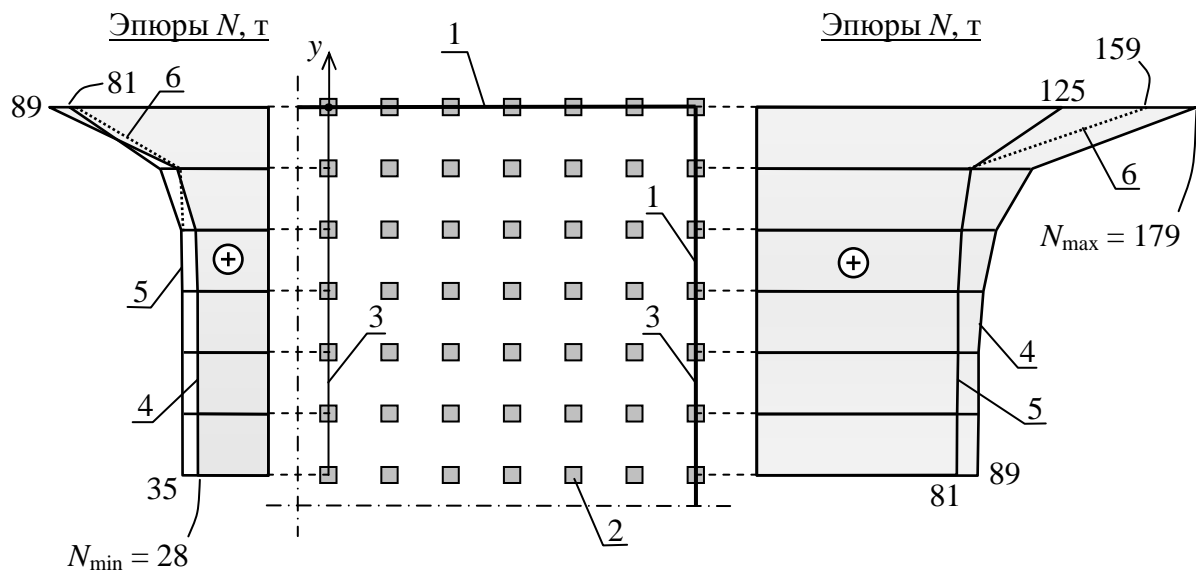


Рис. 1. Эпюры вертикальных сжимающих нагрузок на головы свай. 1 — граница фундаментной плиты в расчетной схеме; 2 — голова сваи; 3 — базовая линия эпюры; 4 — эпюра для линейно-упругого грунта; 5 — эпюра для кулоновского грунта; 6 — эпюра для модели грунта как системы упругих связей

поз. 5). Таким образом, следует ожидать перегруз свай на краю СП, если проектирование основания вести по кнопочной модели. Расчеты показывают также, что линейно-упругая модель грунта заметно искажает распределение нагрузок на сваи, повышая их неравномерность: отношение нагрузок  $N_{\max}/N_{\min}$  для этой модели в рассматриваемом примере составило 6,4, тогда как в наиболее достоверном нелинейном расчете соответствующее отношение нагрузок равно 3,6.

Моделирование свайного основания по методу упругих связей дает распределение нагрузок на сваи, показанное пунктирной эпюрой поз. 6 на рис. 1. Нагрузки на большую часть свай оказались столь близки к результатам нелинейного расчета, что эпюры поз. 5 и 6 неразличимы на значительном протяжении. Нагрузка на угловую сваю по новому методу составила  $N_{\max} = 159$  т, т. е. промежуточное значение между результатами расчетов по линейной и нелинейной конечно-элементным моделям. Следует заметить, что наблюдаемая точность расчета нагрузок на сваи по методу упругих связей получена по модели, в которой параметр  $C_{1гр}$  не оптимизировался, а брался на основе допущения 2.

Новый метод позволяет также адекватно описывать форму и глубину осадочной лунки. В рассматриваемом примере осадка фундаментной плиты вследствие дополнительного давления под подошвой условного фундамента,

установленная по схеме линейно-деформируемого слоя (см. СНиП 2.02.01-83\*), составила 76 мм, осадка плиты в расчете по методу конечных элементов (МКЭ) с применением закона Кулона — 78 мм, осадка по методу упругих связей — 79 мм. На рис. 2 показаны зависимости вертикальных перемещений поверхности грунта на оси  $y$  (рис. 1). Нулевая абсцисса соответствует крайней свае на этой оси. Зависимость 1 — случай кулоновского грунта; зависимость 2 — случай модели грунта как системы упругих связей. Можно видеть малое различие соответствующих перемещений вблизи фундаментной плиты.

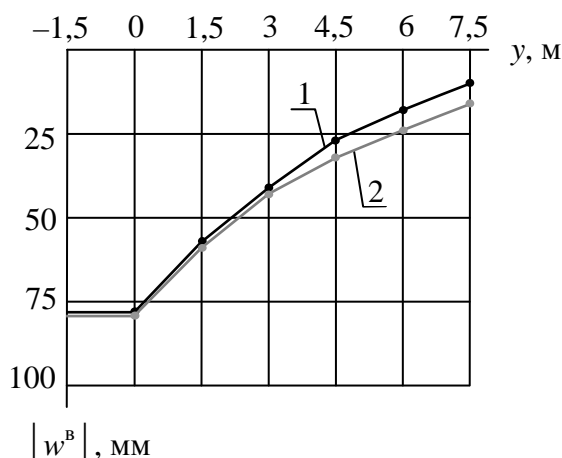


Рис. 2

Возможность моделирования НДС монолитной ФП по методу упругих связей проверена на ряде моделей. В частности, рассматривалась конечно-элементная модель ФП 14-этажного дома с жесткими несущими стенами, расположенными по периметру ФП, и 4 колоннами внутри плана плиты (рис. 3, а). ФП имеет толщину 1,2 м и выполнена на основании, описанном выше (рис. 1). Оси симметрии, показанные на рис. 1, определяют также плоскости симметрии конструктивной схемы дома. В расчетную схему включены конструкции 1 этажа и перекрытие над ним (рис. 3, б). Конструкции над этим перекрытием задаются эквивалентной нагрузкой, распределенной по поверхности перекрытия, а также надлежащим выбором в расчетной схеме объемного веса стен и колонн. Суммарная расчетная нагрузка, приложенная к конструкциям, отнесенная к площади ФП, составляет  $24,1 \text{ т/м}^2$ .

Расчетная схема на рис. 3, б, использовалась для сравнения армирования ФП с помощью следующих моделей: модель А — основание задавалось кнопочной моделью; модель Б — основание моделировалось как система объемных конечных элементов грунта, деформируемого по закону Кулона; модель В — основание вводилось по методу упругих связей; модель Г — основание моделировалось по МКЭ как упругий слой. Для каждой из моделей устанавливался диапазон требуемой площади продольной арматуры в зонах дополнительного армирования. Зона установки дополнительной нижней арматуры задавалась по модели Б, зона установки дополнительной верхней арматуры задавалась по модели А. Расчетную интенсивность арматуры обозначим, соот-

ветственно, нижней  $A_n$ , верхней  $A_v$ . Требуемые площади арматуры в названных зонах (рис. 3, а) сведены в таблицу 2. Условия расчета: бетон В25, арматура А-III, требования по раскрытию трещин учитываются.

Таблица 2

Модель	$A_n$ , см <sup>2</sup> /пм	$A_v$ , см <sup>2</sup> /пм
А	6÷12	14÷33
Б	14÷38	6÷20
В	17÷39	6÷17
Г	31÷52	6÷15

Можно видеть, что учет кулоновского скольжения слоев грунта (случай Б) приводит к значительному увеличению площади нижней арматуры под колоннами сравнительно с кнопочной моделью. (Другие, более сложные примеры показывают, что этой особенностью обладают, главным образом, колонны, образующие на ФП пролеты, прилегающие к краю плиты.) В то же время кнопочная модель дает завышение требований по площади верхней арматуры в крайних пролетах. Наиболее близкие результаты армирования к случаю Б дал расчет по модели с использованием упругих связей. Расчет по МКЭ с упругими объемными элементами грунта привел к чрезмерному увеличению площади нижней арматуры под колоннами и чрезмерному уменьшению площади верхней арматуры в пролетах.

Конечно-элементная подмодель основания, учитывающая кулоновское скольжение слоев грунта, не всегда реализуема, поскольку требует больших ресурсов ЭВМ по времени и памяти. В частности, ориентировочное время счета для модели Б при тактовой частоте процессора 2,1 ГГц может составлять 10

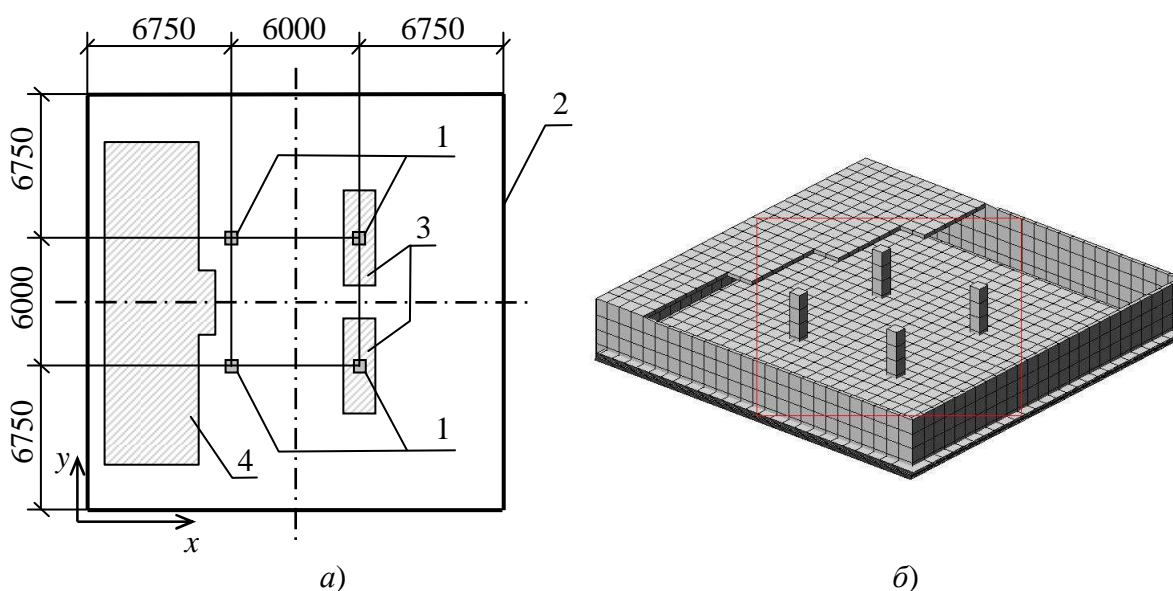


Рис. 3. Тестовая модель армирования ФП: а) план конструкций ФП; б) расчетная схема в графике ПК ЛИРА (перекрытие показано частично). 1 — колонна; 2 — линия стены; 3 — зона дополнительного нижнего армирования направления  $x$ ; 4 — зона дополнительного верхнего армирования направления  $x$

часов даже при понижении размерности модели с учетом симметрии четвертого порядка расчетной схемы. В то же время использование метода упругих связей для моделирования основания требует практически те же ресурсы, что и кнопочная модель.

В проведенных тестовых расчетах по методу упругих связей не потребовалась оптимизация параметра  $C_{1гр}$  путем сопоставления расчетов по этому методу и по МКЭ с нелинейной подмоделью деформаций грунта, поскольку результаты расчетов по этим методам оказались изначально близки. Однако в известных грунтовых условиях корректировка параметра  $C_{1гр}$  может потребоваться. В этом случае достаточно использовать упрощенные конечно-элементные модели с учетом кулоновского скольжения слоев грунта. Например, можно рассматривать случай отдельно взятой жесткой прямоугольной фундаментной плиты на свайном основании под эквивалентной нагрузкой, либо даже ограничиться двумерным расчетом НДС грунта, предполагая плиту бесконечной полосой.

#### Выводы по статье

Моделирование свайного основания по новому методу упругих связей состоит в представлении основания в виде системы узлов, связанных упругими связями с землей и попарно между собой. По результатам расчетов нагрузок на сваи, осадок и армирования ФП метод дает хорошее соответствие нелинейной конечно-элементной модели с учетом кулоновских деформаций грунта. В то же время применение нового метода при расчете НДС сооружений требует незначительных ресурсов ЭВМ по времени и памяти.

Метод моделирования свайного основания с применением упругих объемных конечных элементов грунта существенно искажает требуемое армирование ФП, поскольку завышает нагрузки на крайние сваи и занижает нагрузки на сваи внутри плана ФП. Искажение проявляется в завышении площади нижней арматуры под колоннами, образующими крайние в плане пролеты, и занижении площади верхней арматуры в середине этих пролетов.

Метод расчета свайного основания по кнопочной модели дает неадекватные результаты армирования ФП. Расчеты по этому методу дают заниженную площадь нижней арматуры под колоннами, образующими крайние в плане пролеты, и завышенную площадь верхней арматуры в середине этих пролетов. Нагрузки на сваи, полученные этим методом, оказываются заниженными на краю ФП и завышенными внутри плана ФП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелец-Стрелецкий Е.Б. и др. ЛИРА 9.2. Руководство пользователя. Основы. Учебное пособие / Под ред. Городецкого А.С. – Киев: Факт, 2005. 145 с.